



1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化

翠川三郎¹⁾、三浦弘之²⁾

1) 正会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 教授 工博

e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

2) 正会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 助教 博士(工学)

e-mail : hmiura@enveng.titech.ac.jp

要 約

高層建築物の耐震設計の際、動的解析用地震動として広く用いられている1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録を再数値化し、データ処理を行って、234秒間の数値化記録を得た。得られたデータについて検討し、1) 既存の数値化データのスペクトルと比較すると、周期5秒程度以下ではほぼ一致するものの、それ以上の周期では異なる場合があること、2) 加速度の継続時間は1分強であるが、速度や変位の継続時間はそれより長いこと、3) 周期1秒付近と2.5秒付近のスペクトルのピーク周期帯に着目すると、記録開始から30～40秒の時間帯は実体S波、それ以降の40～60秒の時間帯は盆地生成表面波による可能性があること、を指摘した。

キーワード：強震記録、八戸港湾、1968年十勝沖地震、長周期成分

1. はじめに

1968年十勝沖地震の際に八戸港湾で観測された加速度強震記録には周期約2.5秒の成分が顕著に認められ、それまでに得られた強震記録に比べて長い周期の成分が卓越することから注目された¹⁾。その後、高層建築物の耐震安全性検討のために動的解析を行う際に用いるべき長周期成分等を含む地震波形の代表例としてあげられ²⁾、現在では高層建築物の耐震設計の際、動的解析用地震動の標準3波のひとつとして広く用いられている。この記録の数値化データは港湾技術研究所によるもの(データA)³⁾と東京工業大学小林研究室によるもの(データB)⁴⁾がある。前者は記録開始から119秒間、後者は記録開始の15秒後から120秒間が数値化されている。また、港湾技研では、その後数値化方法を改良し、東西成分を数値化し直している⁵⁾が、このデータは紛失されている。なお、日本建築センターから提供されている波形²⁾、⁶⁾はデータBから主要動部分の36秒間ないし51秒間を切り取ったものである。データAとBを比べると、加速度波形では両者はよく一致するものの、速度波形や応答スペクトルではやや相違がみられる。また、原記象をみると、記録開始から120秒以降で振幅が小さくなっているものの10cm/s²程度の振幅が継続している。そこで、この記録を再数値化し、より丁寧なデータ処理を行い、この記録の長周期成分の特性について検討を行った。

2. データの数値化

2.1 データの読み取り

港湾技術研究所に保存されている原記象紙の密着コピーをスキャナーで読み取り1200dpiの解像度

(1pixelが約0.02mm)で画像化した。図1に示すように、原記象には、上からタイムマーク、南北(SN)成分、固定線1、上下(DU)成分、固定線2、東西(WE)成分の6つのトレースが記録されている。紙送り速度は毎秒10mmで、振幅については1mmが12.5cm/s²の加速度に対応する。なお、本論文では以降、南北成分をSN成分、東西成分をWE成分、上下成分をDU成分と呼ぶ。

原記象紙はA3サイズのマイラー用紙8枚に分割して密着コピーされている。それぞれのコピーには前後それぞれ50mm程度の重複部分があり、中間の300mmは重複していない。それぞれの用紙について重複していない300mmの部分と前後10mm程度の重複部分について数値化した。トレースの太さは2~3ピクセルで、この中心を通るように画面上で確認しながら、振幅の大きな部分では0.05mm以下の間隔で、振幅の小さな部分では0.15mm以下の間隔で、数値化した。固定線については、ほぼ直線であるが、わずかな蛇行がみられ、その変曲点を逃さないように1秒間に10点程度を数値化した。タイムマークについては秒マークの立ち上がりを読み取った。なお、記録開始から約2.5秒間にはタイムマークのトレースに秒マークは認められなかった。

2.2 データの補正

データの補正は港湾技術研究所の改良法⁵⁾を参考にして以下のように行った。

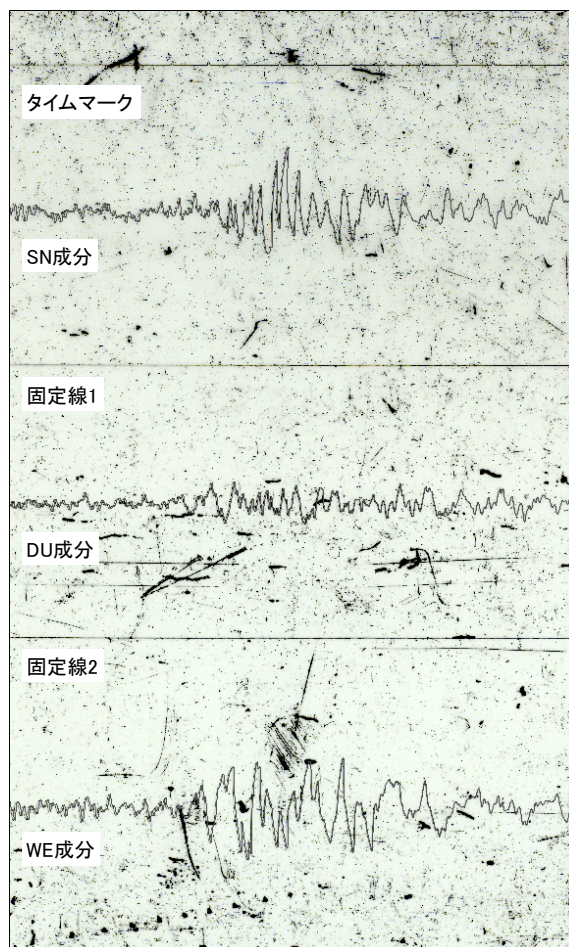


図1 原記象紙の拡大図

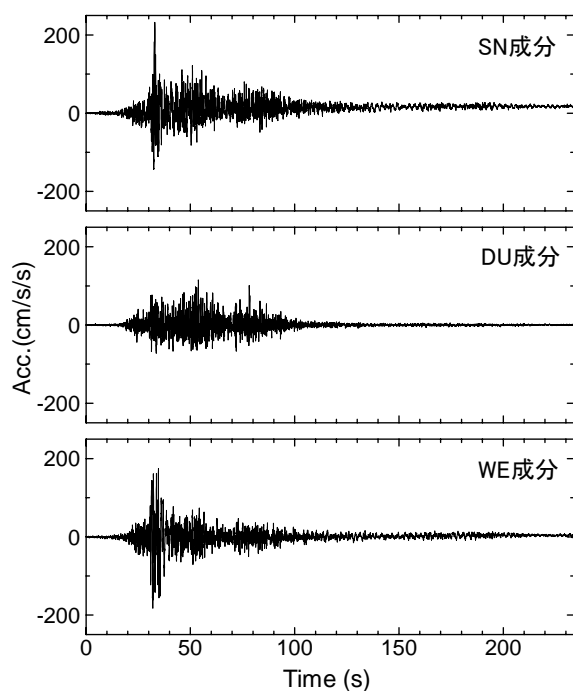


図2 読み取られた加速度波形

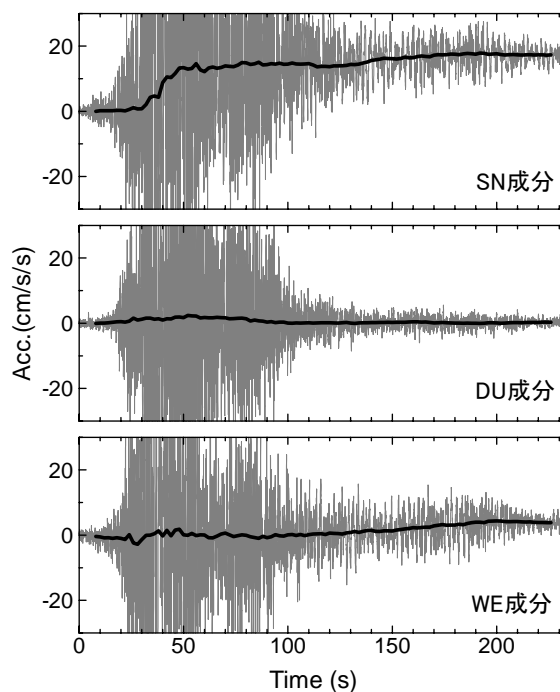


図3 加速度(薄線)とその移動平均値(太線)

- 1) 各成分のデータから固定線のデータを差し引いて基線補正を行う。SN成分については固定線1を、WE成分については固定線2を、DU成分については固定線1と2の平均を用いる。固定線1と2の間隔はほぼ一定で、そのバラツキは0.1mm以内であった。なお、既存の数値化データ^{3),4)}では固定線による基線補正はなされていない。
- 2) 隣り合う用紙のデータの重複部分が重なり合うようにして、データをつなぎ合わせる。
- 3) 円弧補正を行ったあと、記録開始から2秒間について記録紙送りの立ち上がり補正⁴⁾を行う。タイムマークの間隔の平均値は10.0mm、標準偏差は0.1mmと安定していたため、立ち上がり部分以外は紙送り補正は行っていない。
- 4) データを0.01秒の等間隔刻みに補正する。

以上のデータ処理により、3成分とも234秒間の波形データが得られた。得られた波形データを図2に示す。読み取った固定線を用いることにより、概ね基線補正がなされているが、記録の終了部をみると、わずかではあるがゼロ軸が移動していることがわかる。図3に振幅軸を拡大したものと、15秒間の時間ウィンドウに対する移動平均値を示す。SN成分については、記録開始の約25秒後からゼロ軸が移動しはじめ、最終的に約17cm/s²（記録紙上で1.4mm）ゼロ軸が移動している。読み取り精度は0.1mm以下と考えられることから、このゼロ軸の移動は有意なものと判断できる。WE成分についてはゼロ軸の移動は小さいが、最終的に約4cm/s²（記録紙上で0.3mm）移動している。DU成分についてはゼロ軸の移動はほとんどみられない。

2.3 経験的モード分解法による傾斜成分の除去

上述のように固定線による基線補正を行ったにも関わらず、水平動成分にゼロ軸の移動がみられた。同様の現象は、最近の地震の強震記録にもみられる場合がある。木下らは、2003年十勝沖地震で観測された速度波形に長周期のパルス的な信号がみられ、これが地盤の傾斜により生じた準静的な加速度によるものと解釈し、Hilbert-Huang変換を用いた経験的モード分解法EMDにより地震記録から傾斜成分と並進成分を分離している⁷⁾。そこで、木下らにならって、数値化したデータから傾斜成分と並進成分に分離し、並進成分のみを取り出すこととする。

EMDは原信号を複数の固有モード関数IMFに分解するもので⁸⁾、低次が高振動数のものに、高次が低振動数のものに対応する。さらに、この改良版としてアンサンブル経験的モード分解法EEMDが提案されている⁹⁾。EEMDでは、原信号にあるレベルのホワイトノイズを加えた後にEMDによりIMFを求める作業を、位相の異なるホワイトノイズに対して繰り返して行い、得られたIMFを足し合わせるにより、高振動数成分まで正確に抽出できるとされている⁹⁾。

本記録に対してEMDおよびEEMDにより傾斜成分を計算したところ、両者に大きな違いはみられなかったものの、EMDによる結果には、振幅が変化する箇所において、振幅が少し負側に变化した後に正側に变化するといった多少不自然な形状がみられた。このため、本検討では、EEMDを用いることとし、ホワイトノイズのレベルを原データの標準偏差の0.1倍とし、それを100回繰り返して各次IMFを求めた。この場合、14次までのIMFが得られた。ある次数から14次までのIMFを足し合わせたものから、低振動数成分からなる傾斜成分が抽出できる⁷⁾。どの次数から足し合わせるのかが適当かを検討したところ、SN成分、WE成分ともに10次からIMFを足し合わせたものが基線の移動をよく表現していることがわかった。なお、DU成分については、ドリフト成分はほとんどみられず、そもそも傾斜の影響は小さいと考えられることから、傾斜成分の除去は行わなかった。

図4にSN成分の原波形と10次から14次までのIMFを足し合わせた傾斜成分の波形を比較して示す。SN成分をみると、傾斜成分は、原波形の加速度が30cm/s²程度以上となる25秒付近から立ち上がり始め、50秒付近で15cm/s²強の一定値に近づき、その後は緩やかな変化を示している。WE成分についても、SN成分ほど顕著ではないが、同様の傾向をもつ傾斜成分が抽出され、約4cm/s²の基線の移動がみられた。2003年十勝沖地震時

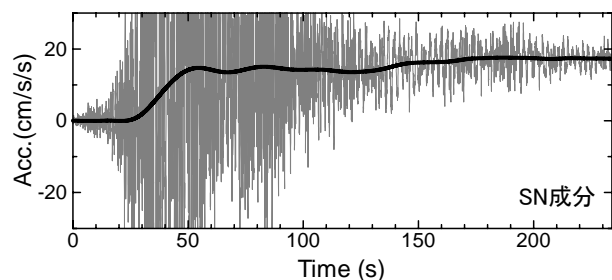


図4 原波形(薄線)と10~14次のIMFの重ね合わせ(太線)

の豊頃町大津での強震記録から、木下ら⁷⁾によって抽出された傾斜成分の波形も、原波形の加速度が 50cm/s^2 程度以上となる時刻から立ち上がり始め、その約20秒後に一定値に近づいており、本記録の傾斜成分と類似している。ただし、基線の移動量は 7cm/s^2 程度で、本記録での移動量と比べると小さい。

地震計の基礎が1度傾くと水平動成分には 17cm/s^2 に相当する基線の移動が生じることから、本記録による基線の移動量は、SN成分で約1度、WE成分で約0.2度の傾斜に対応することになる。強震観測点での地盤変状の報告はみあたらないが、観測点付近で岸壁の移動が報告されていること¹⁰⁾や、ゼロ軸の移動は、水平成分のみにみられ上下成分にみられないことから、傾斜による可能性は否定できない。本記録から抽出された傾斜成分の原因については明確ではないが、原波形からこれらの傾斜成分を引くことで、並進成分を抽出することとした。

2.4 長周期ノイズの除去

一般に長周期成分には、読み取りの際の数値化誤差やデータ処理によるノイズの影響が大きく、上述の並進成分の波形にもこのノイズ成分が含まれている恐れがある。そこで、ノイズ成分を検討するために、加速度を積分して変位波形を求めた。図5にSN成分の結果を示す。FFTによりそのまま積分すると変位は10mにも達し、不自然な波形となる。そこで、長周期成分をカットして積分した。ロールオフ周期15秒、カットオフ周期30秒の台形フィルターを用いた場合でも、記録開始時から大きな変位がみられ、波形が不自然で、ノイズの影響を受けていると考えられる。ロールオフ周期を10秒以下にすると、波形は自然で、ノイズの影響はほとんどみられないものと考えられる。

同様の検討をWE成分、DU成分でも行い、ロールオフ周期を10秒、カットオフ周期を20秒にした場合、3成分ともおおむね自然な変位波形が得られることを確認した。そこで、このフィルターをかけたものを本研究の最終的な数値化データとした。図6に本研究で得られた数値化データの擬似速度応答スペクトルを、データA、Bのそれと比較して示す。周期5秒以下についてみると、本研究による結果とデータAおよびBのスペクトルはおおむね一致しているが、周期5秒以上では、データAがSN成分でかなり大きく、DU成分でもやや大きい。

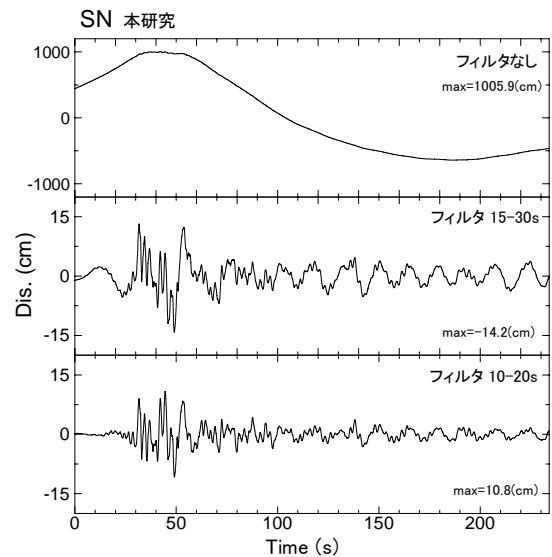


図5 加速度を積分して得られた変位波形

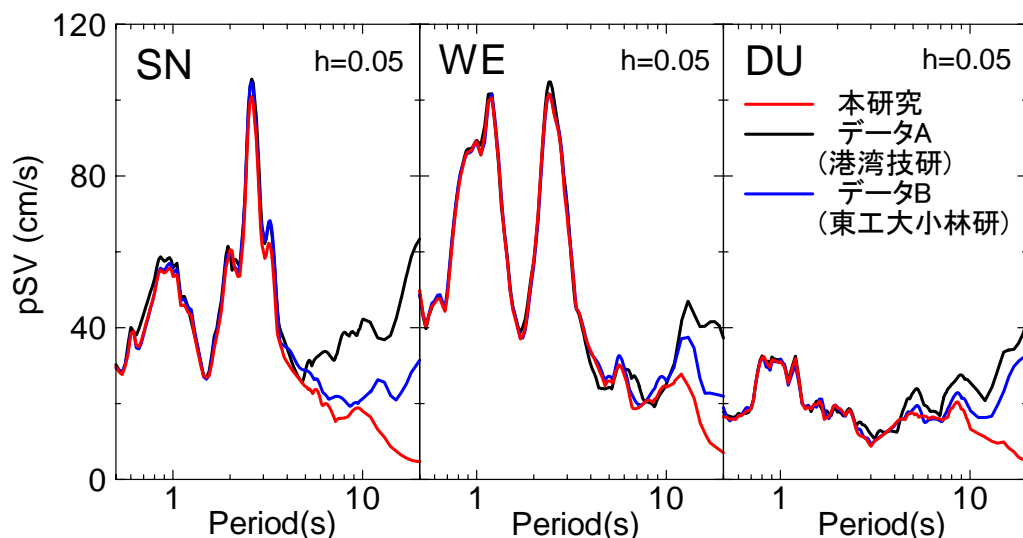


図6 本研究による数値化データと既存の数値化データの擬似速度応答スペクトルの比較

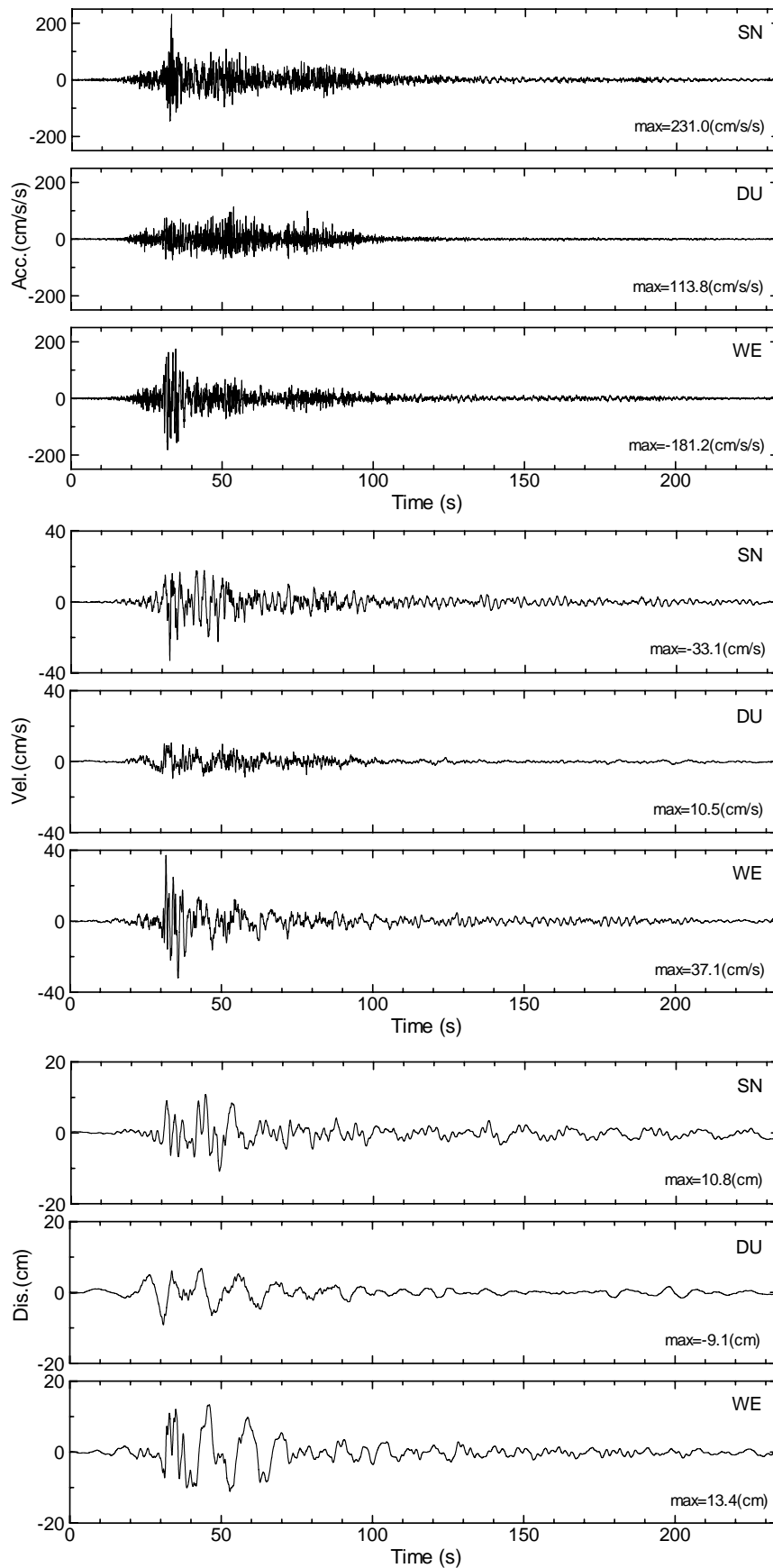


図7 本研究による加速度・速度・変位波形

3. 数値化した強震記録の長周期成分の特性

図7に数値化されたデータの加速度、速度、変位波形を示す。加速度波形をみると、主要動部分は記録開始の約20秒後から100秒間程度続いているように見えるが、水平動成分にはその後も 10cm/s^2 程度と振幅は小さいが、後続動がみられる。この後続動は、速度波形や変位波形でより顕著にみられ、速度波形からは周期2.5秒程度の、変位波形からは周期10秒前後の成分が読み取れる。図8にSN成分の加速度、速度、変位のパワーの累積値を示す。加速度については、記録開始の約30秒後から立ち上がり、約100秒後で全パワーの95%に達しており、Trifunac and Brady¹¹⁾の定義によれば、加速度の継続時間は約70秒となる。一方、速度や変位では全パワーの95%に達するのは、それぞれ約140秒後および約180秒後であり、速度および変位の継続時間はそれぞれ約110秒および約150秒と長くなる。このことは、長周期成分のパワーを十分に評価するためには加速度波形の主要動部分以降も解析する必要があることを示唆している。

スペクトル特性については、図6に示したように、水平成分で周期1秒および2.5秒付近に、上下成分で周期約1秒にそれぞれピークがみられる。これらのピークが主として表面波によるものか、実体波によるものかは、いくつかの見解が示されている¹²⁾⁻¹⁶⁾。そこで、記録の波動的性質を考察するために、マルチフィルター解析を行い、スペクトルの時間的変化について検討した。図9にマルチフィルター解析¹⁷⁾の結果を示す。周期1秒付近と2.5秒付近のスペクトルのピーク周期帯に着目すると、WE成分では、2つの周期帯とも30~40秒の時間帯で振幅が大きい。SN成分では、2.5秒付近の周期帯は30~50秒の時間帯で振幅が大きい、詳細にみると、30~40秒と40~50秒で2つの波群にわかれている。1秒付近の周期帯は30~40秒の時間帯で振幅が大きく、50秒前後の時間帯でもやや大きい。DU成分では1秒の周期帯が卓越し、30~40秒の時間帯で振幅が大きく、50~60秒でもやや大きい。

永井・他¹⁸⁾によれば、この記録が得られた1968年十勝沖地震では、図10に示すように、断層面の東側の破壊開始点Aから破壊が始まり、その後、断層面の南東側でアスペリティBが破壊し、さらに断層面の北西側で最大のアスペリティCが破壊したものとされている。最大のアスペリティCは長宗¹⁹⁾が1倍強震計記象からみいだした顕著な波であるI波を発生した震源に対応する。八戸港湾から約4km南東に位置する八戸測候所での気象庁1倍強震計の記象からS波やI波などの到達時間が村松²⁰⁾により読み取られており、この記象と八戸港湾の変位波形の比較から、八戸港湾の記録の記録開始から約5秒後が破壊開始点AからのS波初動に、約15秒後がアスペリティBからのS波初動に、約28秒後がアスペリティCからのS波初動にそれぞれ対応するものと判断できる。アスペリティCはアスペリティBに比べて有意に大きく、かつ観測点により近いので、記録開始から約28秒後以降は、ほぼアスペリティCからの寄与によるものと考えられる。

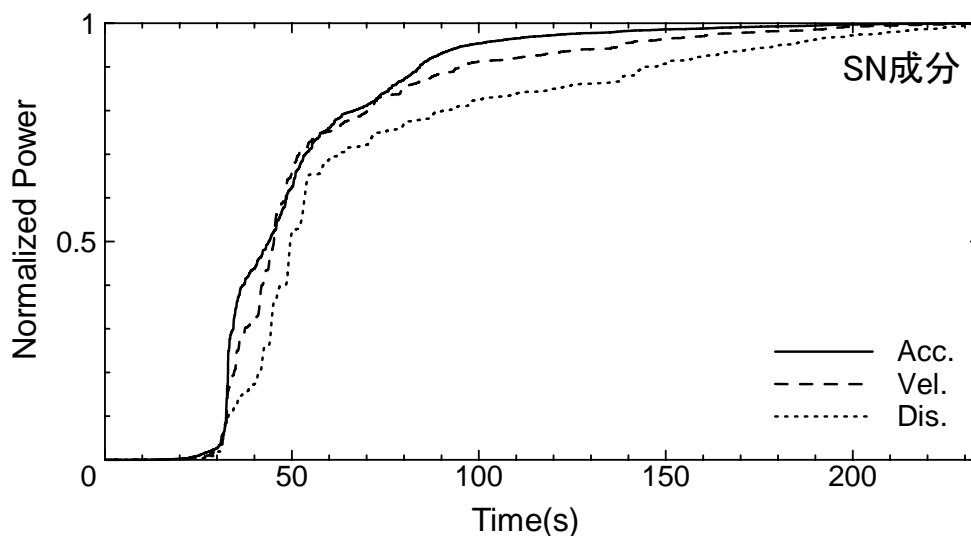


図8 加速度・速度・変位のパワーの累積値

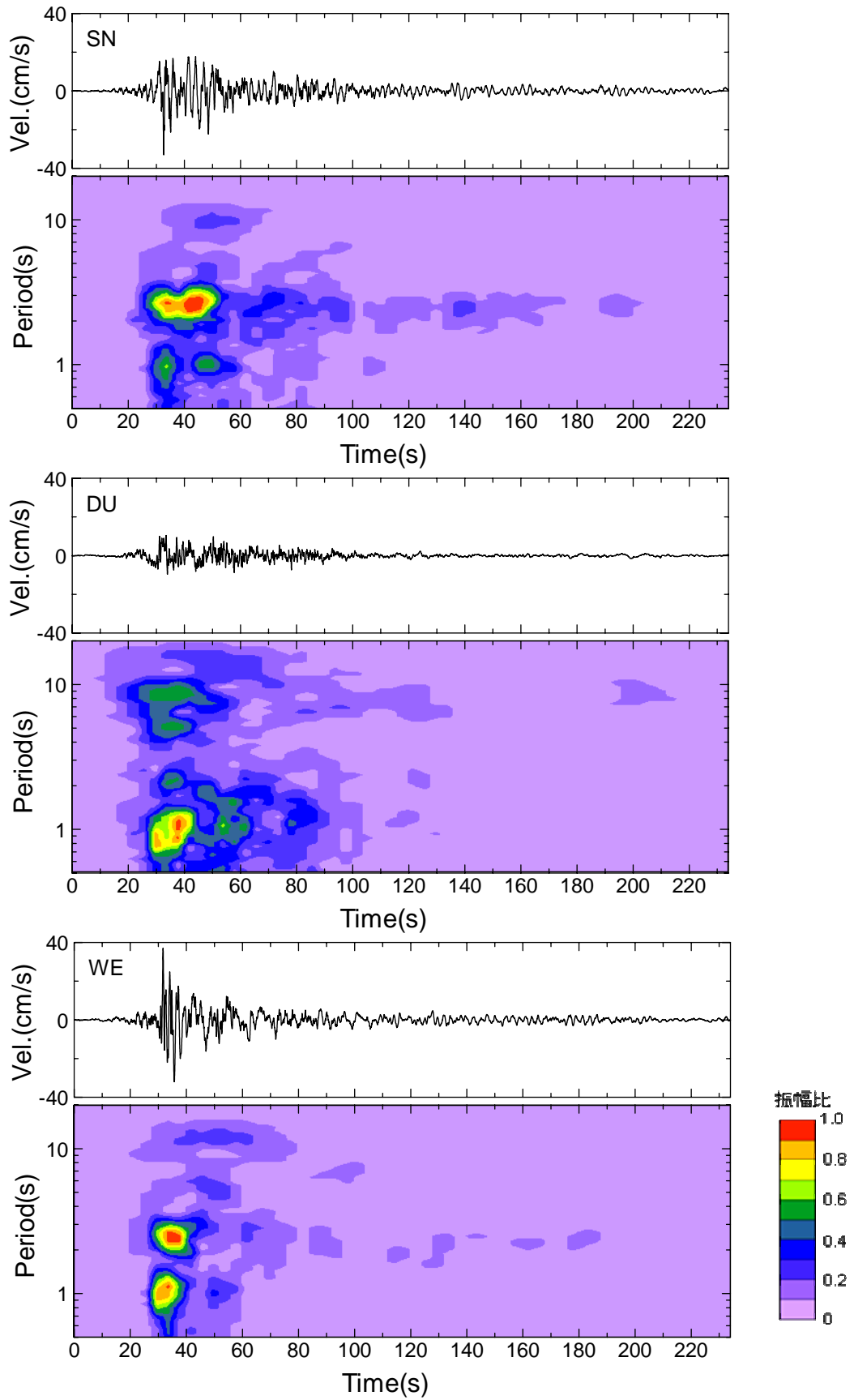


図9 マルチフィルター解析

前述のように3成分とも振幅が大きいのは記録開始から30～40秒の時間帯であることから、これがアスペリティCによるS波部分と推定される。なお、この部分で卓越している周期2.5秒および1秒の成分は、他の観測点での記録にはみられないことから、震源特性によるものとは考えにくく、後述の八戸港湾直下での地盤構造によるものと考えられる。

それ以降の時刻で振幅が大きい部分については、いわゆる盆地生成表面波による可能性が考えられる。八戸港湾の地下構造は地表から深さ20m程度までは砂層で、その下にS波速度で400m/sないし700m/s程度の堆積岩が存在し、深さ約400mで基盤に達する¹⁾。この構造から、Love波の基本および2次モードの卓越周期はそれぞれ約2.5秒および1秒で、Rayleigh波の基本モードの卓越周期は約1秒と計算されている¹⁴⁾。したがって、観測点からアスペリティの方向に対してほぼ直交であるSN成分の周期2.5秒で時間帯40～50秒ではLove波の基本モードが、周期1秒で時間帯50秒前後ではLove波の2次モードが卓越し、また、DU成分の周期1秒で50～60秒の時間帯ではRayleigh波の基本が卓越しているものとも解釈できる。この解釈は神山によるもの¹³⁾⁻¹⁵⁾とほぼ整合する。数値シミュレーション結果にも、震源が比較的近くやや深い場合でも盆地生成表面波が明瞭に現れており²¹⁾、この解釈を支持している。表面波の群速度が200m/s前後であること¹⁴⁾から、八戸港湾直下の構造が沖合数kmから盆地構造として存在していれば、前述の時間差はおおむね説明可能である。

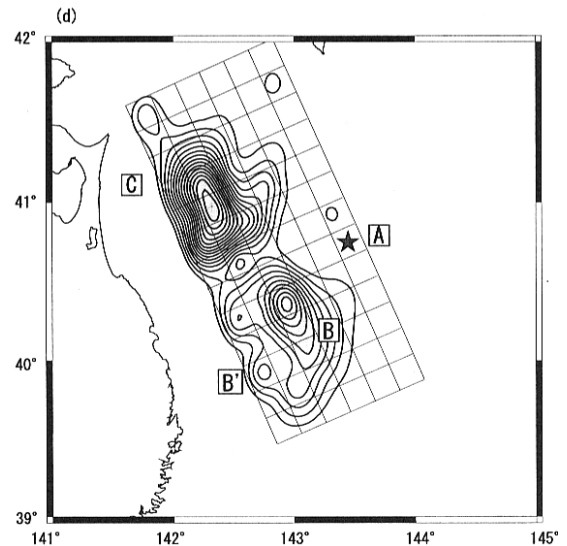


図10 1968年十勝沖地震の震源及びアスペリティの位置(永井・他による)

4. 結論

高層建築物の耐震設計の際、動的解析用地震動として広く用いられている1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録を再数値化し、234秒間のデータを得た。数値化されたデータに固定線による基線補正を施したにもかかわらず水平動成分にゼロ軸の移動がみられたことから、傾斜成分を除去することで並進成分を取り出した。さらにノイズ成分とみられる周期10秒以上の成分を除去して、本研究での数値化データとした。このデータの特性について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 本研究で得られたデータと既存の数値化データのスペクトル特性を比較したところ、周期5秒程度以下ではほぼ一致するものの、それ以上の周期では異なる場合がある。
- 2) 加速度の継続時間は1分強であるが、速度や変位の継続時間はそれより長く、長周期成分のパワーを十分に評価するためには加速度波形の主要動部分以降も解析する必要があることが示唆される。
- 3) マルチフィルター解析結果を行い、周期1秒付近と2.5秒付近のスペクトルのピーク周期帯に着目して検討したところ、記録開始から30～40秒の時間帯は実体S波、それ以降の40～60秒の時間帯は盆地生成表面波による可能性がある。

謝辞

現現象紙のコピーは独立行政法人港湾空港技術研究所の野津厚氏を通じてお借りした。研究の動機付けは日本ERI(株) 深田良雄氏から与えていただいた。EEMDの計算の際には、台湾国立中央大学Huang教授によるプログラム(<http://rcada.ncu.edu.tw/research1.htm>)を利用させていただいた。本研究の一部は、文部科学省グローバルCOEプログラム「震災メカリスク軽減の都市地震工学国際拠点」(代表者:東工大時松孝次教授)によっている。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大沢 胖(研究代表者)：1968年十勝沖地震における八戸港湾の強震記録と地盤特性、文部省科学研究費(特定)報告書「構造物災害に対する地震動特性の研究」、106pp.、1972.
- 2) 日本建築センター高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について、ビルディングレター、'86.6、pp.49-50、1986.
- 3) 土田 肇・他：1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録、港湾技研資料、No.80、476pp.、1969.
- 4) 小林啓美：八戸港の強震記録のResponse Spectra、1968年十勝沖地震災害調査報告、日本建築学会、pp.21-29、1968.
- 5) 井合 進・他：強震記録の数値化と補正、港湾技研資料、No.286、56pp.、1978.
- 6) 日本建築センター：高層建築物の動的解析用地震動に関する研究、日本建築センター平成6年度研究助成報告書、No.9404、1994.
- 7) Kinoshita, S. *et al.*: Tilt Motions Recorded at Two WISE Sites for the 2003 Tokachi-Oki Earthquake (M 8.3), *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.99, pp.1251-1260, 2009.
- 8) Huang, N. E. *et al.*: The Empirical Mode Decomposition Method and the Hilbert Spectrum for Non-Stationary Time Series Analysis, *Proc. R. Soc. London A*, Vol.454, pp.903-995, 1998.
- 9) Wu, Z. and Huang, N. E.: Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise Assisted Data Analysis Method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol.1, No.1, pp.1-41, 2008.
- 10) 運輸省港湾局・他：青森県における港湾被害 八戸港、1968年十勝沖地震港湾被害報告、pp.63-83、1968.
- 11) Trifunac, M. D. and A. G. Brady: A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.65, pp.581-626, 1975.
- 12) 嶋 悦三：強震地動に見られる表面波成分、第3回日本地震工学シンポジウム、pp.277-282、1970.
- 13) 神山 真：強震記録の波動論的考察、第13回地震工学研究発表会講演概要、pp.41-44、1974.
- 14) 神山 真：強震記録の波動論的考察(第2報)、土木学会第29回年次学術講演会概要集、pp.522-523、1974.
- 15) 神山 真：強震記録における上下動成分の特性について、土木学会第32回年次学術講演会梗概集、pp.322-323、1977.
- 16) 小林啓美、長橋純男：地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の性質、日本建築学会論文報告集、第240号、pp.79-92、1976.
- 17) Dziewonski, A., S. Bloch and M. Landsman: A Technique for the Analysis of Transient Seismic Signal, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.59, pp.427-444, 1969.
- 18) 永井理子・菊地正幸・山中佳子：三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究－1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較－、地震第2輯、Vol.54、pp.267-280、2001.
- 19) 長宗留男：大地震生成の過程(1968年十勝沖地震および1963年エトロフ島沖の地震)、地震第2輯、Vol.22、pp.104-114、1969.
- 20) 村松郁栄：1968年十勝沖地震の地震動、1968年十勝沖地震における八戸港湾の強震記録と地盤特性、pp.86-106、1972.
- 21) 山中浩明：三次元地下構造モデルを用いた強震動シミュレーションにおける表層地盤の取り扱い、第37回地盤震動シンポジウム資料集、pp.61-68、2009.

(受理：2009年12月14日)
(掲載決定：2010年2月5日)

Re-digitization of Strong Motion Accelerogram at Hachinohe Harbor during the 1968 Tokachi-oki, Japan Earthquake

MIDORIKAWA Saburoh ¹⁾, MIURA Hiroyuki ²⁾

1) Member of JAEE, Professor, Department of Built Environment,
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2) Member of JAEE, Assistant Professor, Department of Built Environment,
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

The strong motion accelerogram observed at Hachinohe harbor during the 1968 Tokachi-oki earthquake is re-digitized and examined because of frequent use of the record in seismic design of high-rise buildings. After the data processing, the digitized data are obtained for 234 seconds. The data indicate that 1) the spectra are almost same as those of the previous digital data, but not at periods longer than 5 seconds, 2) the duration of acceleration is about 70 seconds, but longer for velocity and displacement, and 3) the combination of the S-waves and basin-induced surface waves may produce the larger amplitudes at longer periods.

Key Words: Strong Motion Record, Hachinohe harbor, the 1968 Tokachi-oki Earthquake, Long-period motion